

Шаихова Д.Р.¹, Кикоть А.М.¹, Берёза И.А.¹, Сутункова М.П.^{1,2}

Связь полиморфизма гена *GSTP1* и его экспрессии с содержанием гемоглобина в крови работников производства по переработке свинца

¹ФБУН «Екатеринбургский медицинский научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия;²ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России, 620028, Екатеринбург, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Известно, что на предприятиях по производству свинца условия труда сопряжены с воздействием различных вредных химических веществ, содержащихся в воздухе рабочей зоны. Различные стрессовые факторы влияют на эритроциты, вызывают их необратимые повреждения и в дальнейшем приводят к гибели клеток. Таким образом, антиоксидантная система, способная противостоять активным формам кислорода и ликвидировать нанесённые ими повреждения, выполняет важную роль в защите клеток этого типа. Значительную часть антиоксидантной системы составляет глутатион, а глутатион-S-трансфераза класса пи (*GSTP1*-1) присутствует во многих тканях млекопитающих и является наиболее распространённым внутриэритроцитарным изоферментом, составляющим 95% всего пула глутатион-S-трансфераз.

Цель исследования — изучение влияния полиморфизма гена *GSTP1* и его экспрессии на содержание гемоглобина в крови работников производства по переработке свинца из вторичного сырья.

Материалы и методы. Для исследования связи полиморфизма rs1695 гена *GSTP1* и уровня гемоглобина в крови была сформирована выборка из 329 мужчин, работающих на предприятии по производству и переработке свинца из вторичного сырья. Выделение ДНК из образцов цельной крови выполняли солевым методом по стандартной методике, определение полиморфизма rs1695 гена *GSTP1* проводили с помощью ПЦР в режиме реального времени с флуоресцентными зондами. Для определения экспрессии гена *GSTP1* была сформирована выборка из 54 мужчин (плавильщики отделения рафинирования), выделение РНК проводили с использованием реагента ExtractRNA, определение уровня экспрессии — с помощью ПЦР в режиме реального времени.

Результаты. Анализ влияния генотипа *GSTP1* на уровень гемоглобина у работников разных подразделений показал, что мутантный генотип (G/G) связан с более низкими уровнями гемоглобина в крови именно у работников отделения рафинирования. Проведённое исследование уровня экспрессии гена *GSTP1* у работников отделения рафинирования (рафинировщиков) и группы сравнения в 2022 г. выявило, что уровень экспрессии был статистически значимо ниже у экспонированной группы работников.

Ограничения исследования. Не учитывалась этническая принадлежность обследуемых лиц.

Заключение. В исследовании была установлена связь полиморфизма гена *GSTP1* с уровнем гемоглобина в крови работников отделения рафинирования (рафинировщиков) производства свинца из вторичного сырья. Также было обнаружено снижение уровня экспрессии гена *GSTP1* в крови работников, подвергающихся вредному воздействию, что говорит о дополнительном ингибировании процессов детоксикации на уровне экспрессии генов.

Ключевые слова: экспрессия генов; полиморфизм генов; свинец; биомаркёры; профессиональный риск; гемоглобин

Соблюдение этических стандартов. Исследования были проведены в соответствии с этическими принципами, изложенными в Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации, и одобрены локальным этическим комитетом ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (протокол № 1 от 26.02.2021 г.). Все участники дали информированное добровольное письменное согласие на участие в исследовании.

Для цитирования: Шаихова Д.Р., Кикоть А.М., Берёза И.А., Сутункова М.П. Связь полиморфизма гена *GSTP1* и его экспрессии с содержанием гемоглобина в крови работников производства по переработке свинца. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(12): 1706–1710. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-12-1706-1710>

Для корреспонденции: Шаихова Дарья Рамильевна, e-mail: darya.boo@mail.ru

Участие авторов: Шаихова Д.Р. — обработка данных, статистический анализ, написание текста, редактирование; Кикоть А.М., Берёза И.А. — сбор материала и обработка данных, редактирование; Сутункова М.П. — концепция и дизайн исследования. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 05.11.2025 / Поступила после доработки: 18.11.2025 / Принята к печати: 02.12.2025 / Опубликовано: 15.01.2026

Daria R. Shaikhova¹, Anna M. Kikot¹, Ivan A. Bereza¹, Marina P. Sutunkova^{1,2}

Relationship between the *GSTP1* gene polymorphism and its expression and hemoglobin levels in workers of a secondary lead smelter

¹Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation;²Ural State Medical University, Yekaterinburg, 620028, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Working conditions in lead production are known to be associated with exposure to various harmful chemicals in the workplace air. Erythrocytes are constantly exposed to various stress factors causing irreversible damage and leading to the cell death. Thus, the antioxidant system, capable of inactivating reactive oxygen species (ROS) and eliminating the associated damage, plays an important role in protecting this type of cells. Glutathione is a significant part of this system, while glutathione-S-transferase Pi (*GSTP1*-1) is present in many mammalian tissues and the most common intraerythrocytic isoenzyme, representing 95 % of the total pool of glutathione-S-transferases.

The purpose of the study was to establish the effect of *GSTP1* gene polymorphism and its expression on the hemoglobin level in workers engaged in secondary lead processing.

Materials and methods. To find the relationship between the rs1695 polymorphism of the *GSTP1* gene and the blood hemoglobin level, three hundred twenty nine male workers of a secondary lead smelter were included in the study. DNA was isolated from whole blood samples by the salt method according to the standard technique, the rs1695 polymorphism of the *GSTP1* gene was determined using real-time PCR with fluorescent probes. In 54 smelters of the refining department, we isolated RNA using the ExtractRNA reagent and determined the gene expression level using real-time PCR.

Results. The analysis of the effect of the *GSTP1* genotype on the hemoglobin level among the workers of various departments demonstrated the mutant genotype (G/G) to be associated with lower hemoglobin levels in workers in the refining department. The study of the *GSTP1* gene expression level in workers of the refining department (refiners) and the comparison group in 2022 revealed that the expression level was statistically lower in the exposed workers.

Limitations. Ethnicity was not determined in this study.

Conclusions. We established a relationship between the *GSTP1* gene polymorphism and the hemoglobin level in the refiners of the secondary lead smelter. We also found a decrease in the level of *GSTP1* gene expression in the blood of workers exposed to occupational risk factors, indicating additional inhibition of detoxification processes at the level of gene expression.

Keywords: gene expression; gene polymorphism; lead; biomarkers; occupational risk; hemoglobin

Compliance with ethical standards. The study was conducted in accordance with ethical principles of the WMA Declaration of Helsinki and approved by the Ethics Committee of the Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (protocol No. 1 of February 26, 2021). All participants gave informed voluntary written consent to participate in the study.

For citation: Shaikhova D.R., Kikot A.M., Bereza I.A., Sutunkova M.P. Relationship between the *GSTP1* gene polymorphism and its expression and hemoglobin levels in workers of a secondary lead smelter. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(12): 1706–1710. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-12-1706-1710> <https://elibrary.ru/pcquxr> (In Russ.)

For correspondence: Daria R. Shaikhova, e-mail: darya.boo@mail.ru

Contribution: Shaikhova D.R. — data processing, statistical analysis, draft manuscript preparation, editing; Kikot A.M., Bereza I.A. — data collection and processing, editing; Sutunkova M.P. — study conception and design. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The study had no sponsorship.

Received: November 5, 2025 / Revised: November 18, 2025 / Accepted: December 2, 2025 / Published: January 15, 2026

Введение

Сохранение здоровья работающих граждан — одно из приоритетных направлений политики Российской Федерации. Известно, что на предприятиях по производству свинца условия труда сопряжены с воздействием различных вредных химических веществ (Pb, Zn, Cd, Cu, As, Sb и др.), содержащихся в воздухе рабочей зоны и влияющих на состояние здоровья работников, что может приводить к развитию болезней [1, 2]. Поэтому актуальной задачей является поиск надёжных биомаркёров, особенно на молекулярном уровне, для своевременного предотвращения негативных последствий и прогнозирования рисков.

К основным механизмам токсического действия ксенобиотиков относится их способность генерировать активные формы кислорода (АФК), избыток которых приводит к окислительному стрессу, вызывающему нарушения многих биохимических процессов и оказывающему негативное воздействие на кровеносную систему [3, 4]. Эритроциты постоянно подвергаются влиянию различных стрессовых факторов, которые приводят к необратимым повреждениям и гибели клеток. Таким образом, антиоксидантная система, способная инактивировать АФК и ликвидировать нанесённые ими повреждения, выполняет важную роль в защите данного типа клеток. Значительную часть этой системы составляет глутатион, основной низкомолекулярный тиол эритроцитов, который защищает белки от окисления [5]. Глутатион-S-трансфераза класса пи (*GSTP1*-1) присутствует во многих тканях млекопитающих и является наиболее распространённым внутриэритроцитарным изоферментом, составляющим 95% всего пула глутатион-S-трансфераз [6]. Известно, что полиморфизм rs1695 гена *GSTP1* приводит к снижению ферментативной активности белка, что потенциально ухудшает способность к детоксикации соединений [7]. Ранее была описана связь данного полиморфного варианта с развитием многих болезней, прямо или косвенно связанных с окислительным стрессом [8]. Предположительно, этот фермент является индуцируемым (его экспрессия модулируется уровнями токсической нагрузки), и, следовательно, экспрессия данного гена представляет собой возможный биомаркёр эффекта при заболеваниях, связанных с дисфункцией таких органов, как печень и почки [9]. Однако связь данного гена с уровнем гемоглобина в крови работников, подвергающихся вредным производственным факторам, ранее не была исследована.

Цель исследования — изучение влияния полиморфизма гена *GSTP1* и его экспрессии на содержание гемоглобина в крови у работников производства по переработке свинца из вторичного сырья.

Материалы и методы

Исследование проводилось на базе ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП в рамках периодического медицинского осмотра (ПМО) в 2022 г. Для исследования связи полиморфизма rs1695 гена *GSTP1* и уровнем гемоглобина в крови была сформирована выборка из работников предприятия по производству и переработке свинца из вторичного сырья. Обследованы 329 мужчин из следующих структурных подразделений: административное (16), ремонтно-механический цех (80), энергоцех (30), транспортный цех (27), металлургический цех (61), отделение рафинирования металлургического (плавильного) цеха (68), отделение свинца черного металлургического (плавильного) цеха (47). Возраст мужчин — от 25 до 66 лет (средний возраст — $44,091 \pm 9,301$ года).

В исследование включали работников на основании следующих критериев: мужской пол; информированное добровольное письменное согласие на клинико-лабораторное обследование; общий стаж работы более 5 лет; отсутствие профессиональных установленных болезней; отсутствие обострения хронических болезней.

Показатели уровня гемоглобина (стандартная методика с использованием гематологического анализатора) в крови были взяты из карт ПМО, который проводится на базе ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП, за 2017–2022 гг.

Определение полиморфизма гена *GSTP1* (rs1695). Выделение ДНК из образцов цельной крови проводили солевым методом по стандартной методике. Концентрацию и чистоту выделенной ДНК определяли с использованием спектрофотометра NanoDrop-ONE (Thermo Fisher Scientific, США). Амплификацию проводили в режиме реального времени с зондами и праймерами, представленными в табл. 1.

После обработки первичных данных для каждого образца был определён один из генотипов: А/А; А/Г — нормальный гомозиготный или гетерозиготный варианты; Г/Г — мутантная гомозигота, снижение функционального продукта гена.

Определение уровня экспрессии гена *GSTP1*. Для определения экспрессии гена *GSTP1* на основании полученных данных по полиморфизму rs1695 была сформирована выборка из 54 мужчин (плавильщики отделения рафинирования,

Таблица 1 / Table 1

Последовательность праймеров и зондов

Sequence of primers and probes

Ген Gene	Направление Direction	Последовательность / Sequence 5' → 3'
<i>GSTP1</i>	Прямой / Direct	GCTCTATGGGAAGGACCAGCA
	Обратный / Reverse	CCCCAGTGCCCAACCCTGGT
	Зонд (аллель A) / Probe (allele A)	CGTGGAGGACCTCCGCTGCAAATACATCTCCCTCATCTACACCAACTATGT
	Зонд (аллель G) / Probe (allele G)	CGTGGAGGACCTCCGCTGCAAATACGTCTCCCTCATCTACACCAACTATGT

группа Р). В качестве группы сравнения были выбраны 16 мужчин из административного подразделения (группа К), которые в отличие от плавильщиков не подвергались воздействию вредных производственных факторов.

Тотальную РНК из образцов венозной крови выделяли с использованием реагента ExtractRNA согласно протоколу производителя. Концентрацию и чистоту выделенной РНК определяли с использованием спектрофотометра NanoDrop-ONE (Thermo Fisher Scientific, США). Обратную транскрипцию проводили с использованием набора реактивов MMLV-RH («Диаэм», Россия) в соответствии с инструкциями производителя в амплификаторе Bio-Rad T100 (Bio-Rad Laboratories, США). Амплификацию выполняли в режиме реального времени с использованием SYBR Green на амплификаторе QuantStudio 3 (Thermo Fisher Scientific, США). Прямой и обратный праймеры представлены в табл. 2.

Данные амплификации анализировали методом $2^{-\Delta\Delta C_t}$, который показывает, во сколько раз изменяется экспрессия гена *GSTP1*. В качестве внутреннего контроля использовали ген *GAPDH*.

Статистический анализ. Нормальность распределения выборочных данных проверяли по критерию Колмогорова – Смирнова. Для статистической обработки экспериментальных данных использовали критерий Вилкоксона, а также критерий Краскела – Уоллиса и непараметрический *U*-критерий Манна – Уитни для сравнения двух независимых групп в программе Statistica (StatSoft, США). Результаты считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты

Исследование выявило у 329 работников производства переработки свинца из вторичного сырья изменение уровня гемоглобина в крови за 2017–2022 гг. (рис. 1), которое может быть связано с разными объемами производства на данном предприятии и, следовательно, с различной экспозицией работников вредными факторами.

Анализ влияния генотипа *GSTP1* на уровень гемоглобина у работников различных подразделений продемонстрировал, что мутантный генотип (G/G) связан с более низкими уровнями гемоглобина в крови именно у работников отделения рафинирования, большую часть которых составляют рафинировщики. Уровень гемоглобина был значительно ниже у носителей мутантного генотипа в 2018–2020 гг. ($p = 0,021$; $p = 0,043$; $p = 0,0001$ соответственно) (рис. 2).

Таблица 2 / Table 2

Последовательность праймеров

Sequence of primers

Ген Gene	Направление Direction	Последовательность / Sequence 5' → 3'
<i>GSTP1</i>	Прямой / Direct	GCAAATACATCTCCCTCATC
	Обратный / Reverse	AGGTTGTAGTCAGCGAAG
<i>GAPDH</i>	Прямой / Direct	GAAGGTGAAGGTCGGAGTCA
	Обратный / Reverse	GAAGATGGTGATGGGATTTC

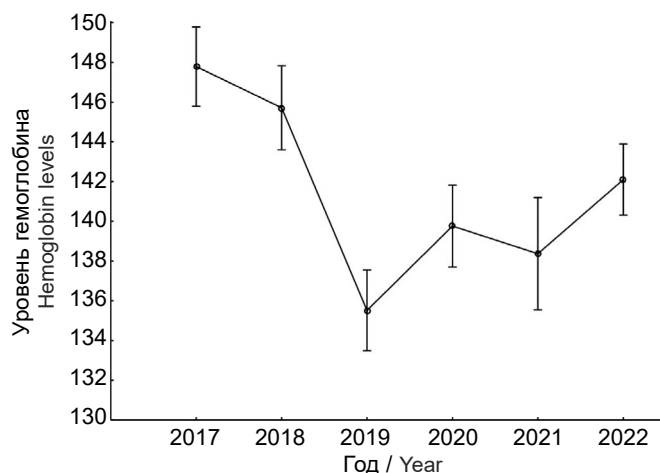


Рис. 1. Уровень гемоглобина у работников предприятия по переработке свинца из вторичного сырья за 2017–2022 гг. Точками обозначены средние значения \pm ошибка среднего.

Fig. 1. Hemoglobin levels in workers of the secondary lead smelter over 2017–2022. Dots indicate mean values \pm error of the mean.

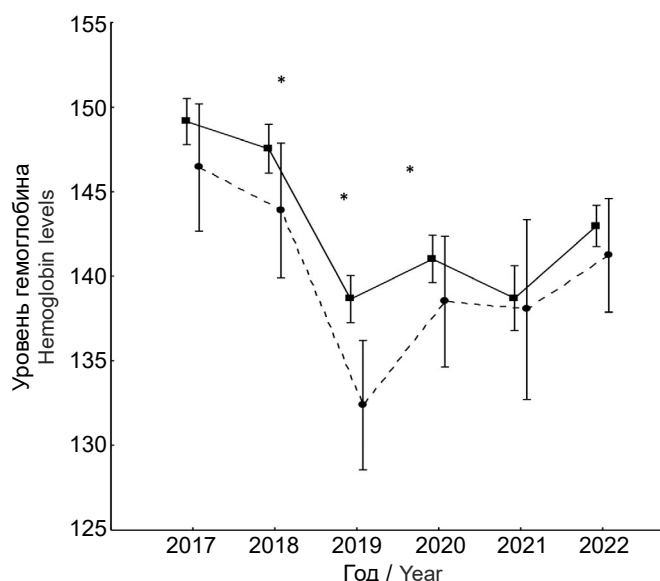


Рис. 2. Уровень гемоглобина у работников отделения рафинирования (2017–2022 гг.) в зависимости от генотипа *GSTP1*. Квадратами обозначены средние значения \pm ошибка среднего для генотипов A/A и A/G. Точками обозначены средние значения \pm ошибка среднего для генотипа G/G. Звёздочкой обозначены статистически значимые отличия ($p < 0,05$).

Fig. 2. Hemoglobin levels in refining department workers over 2017–2022 by the *GSTP1* genotype. Squares indicate mean values \pm standard error for the A/A and A/G genotypes. Dots indicate mean values \pm standard error for the G/G genotype. Statistically significant differences are marked with an asterisk $p < 0.05$.

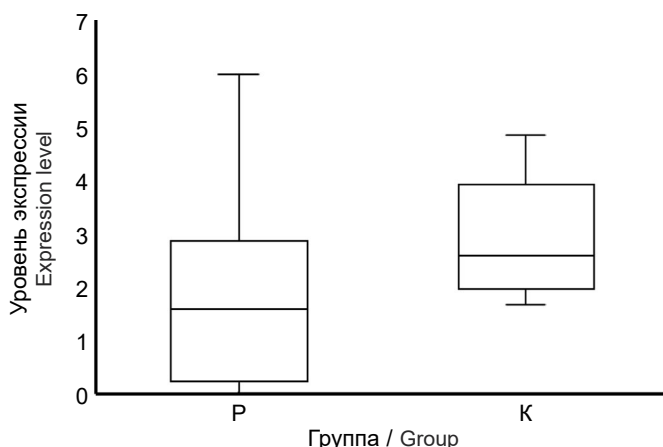


Рис. 3. Уровень экспрессии гена *GSTP1* у работников производства свинца из вторичного сырья (P – рафинировщики; K – группа сравнения; линия – медиана; края графиков – квартили, минимальные и максимальные значения – усы).

Fig. 3. The level of *GSTP1* gene expression in workers of the secondary lead smelter (P – refiners; K – comparison group; line – median; edges of graphs – quartiles, minimum and maximum values – whiskers).

Проведённое исследование уровня экспрессии гена *GSTP1* у работников отделения рафинирования (рафинировщиков) и группы сравнения в 2022 г. выявило, что уровень экспрессии был статистически значимо ниже у экспонированной группы работников ($p = 0,0178$) (рис. 3).

Обсуждение

В данном исследовании была впервые показана связь генотипа *GSTP1* с уровнем гемоглобина в крови у работников, подвергающихся вредным производственным факторам. Так, носительство мутантного (G/G) генотипа *GSTP1* у работников отделения рафинирования было связано с более

низкими показателями уровня гемоглобина. Вероятно, это обусловлено механизмом токсического действия различных загрязнителей воздуха рабочей зоны, в том числе свинца, посредством образования АФК, избыток которых приводит к окислительному стрессу, а также ингибированием различных ключевых ферментов синтеза гемоглобина [8]. В связи с этим можно выдвинуть предположение, что данная мутация может являться биомаркером восприимчивости работников к вредным факторам производства свинца из вторичного сырья.

Также была установлена более низкая экспрессия гена *GSTP1* у экспонированной группы работников, что согласуется с данными других исследований [9]. Ansari G.A. с соавт. [10] показали, что ксенобиотики ингибируют *GSTP1* в эритроцитах, следовательно, химическое воздействие приводит к снижению способности e-GST детоксифицировать ксенобиотики. Из полученных нами результатов следует, что у работников наряду с генетической предрасположенностью при высокой токсической нагрузке происходит дополнительное ингибирование процессов детоксикации на уровне экспрессии генов, что требует внимания при составлении полной картины состояния здоровья и прогнозировании рисков.

Ограничения исследования. Не учитывалась этническая принадлежность обследуемых лиц.

Заключение

В исследовании была установлена связь полиморфизма гена *GSTP1* с уровнем гемоглобина в крови у работников отделения рафинирования (рафинировщиков) производства свинца из вторичного сырья. Также было обнаружено снижение уровня экспрессии гена *GSTP1* в крови работников, подвергавшихся вредному воздействию, что говорит о дополнительном ингибировании процессов детоксикации на уровне экспрессии генов.

Полученные данные можно использовать как основу для составления полной картины состояния здоровья, прогнозирования рисков и организации медико-профилактических мероприятий.

Литература

- Ивашенко М.А., Федорук А.А., Мартин С.В., Кудряшов И.Н. Гигиеническая оценка условий труда плавильщиков при получении свинца из вторичного сырья. В кн.: *Проблемы гигиенической безопасности и профилактики нарушений трудоспособности у работающих: Материалы Всероссийской научно-практической интернет-конференции*. Нижний Новгород: Медиаль; 2021: 96–102. <https://elibrary.ru/kxhhop>
- Гомзикова Е.А., Шеломенцев И.Г. Анализ осевшей пыли методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) для экспрессной идентификации элементного состава аэрозолей рабочей зоны. В кн.: *Практические аспекты социально-гигиенического мониторинга и управления риском здоровью населения: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Екатеринбург; 2023: 56–7.
- Giel-Pietraszuk M., Hybza K., Chełchowska M., Barciszewski J. Mechanisms of lead toxicity. *Adv. Cell Biol.* 2012; 39(2): 217–47.
- Jomova K., Alomar S.Y., Nepovimova E., Kuca K., Valko M. Heavy metals: Toxicity and human health effects. *Arch. Toxicol.* 2025; 99(1): 153–209. <https://doi.org/10.1007/s00204-024-03903-2>
- Рыспекова Н.Н., Нурмухамбетов А.Н., Аскарова А.Е., Аканов А.А. Роль тяжелых металлов в развитии анемий (обзор литературы). *Вестник Казахского национального медицинского университета*. 2013; (3–2): 46–51. <https://elibrary.ru/yofboa>
- Schafer F.Q., Buettner G.R. Redox environment of the cell as viewed through the redox state of the glutathione disulfide/glutathione couple. *Free Radic. Biol. Med.* 2001; 30(11): 1191–212. [https://doi.org/10.1016/s0891-5849\(01\)00480-4](https://doi.org/10.1016/s0891-5849(01)00480-4)
- Awasthi Y.C., Singh S.V. Purification and characterization of a new form of glutathione S-transferase from human erythrocytes. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 1984; 125(3): 1053–60. [https://doi.org/10.1016/0006-291x\(84\)91390-1](https://doi.org/10.1016/0006-291x(84)91390-1)
- Амромина А.М., Ситников И.А., Шаихова Д.Р. Взаимосвязь полиморфных вариантов генов *GSTM1*, *GSTT1*, *GSTP1* с риском развития заболеваний (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2021; 100(12): 1385–90. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-12-1385-1390> <https://elibrary.ru/gnsavx>
- Carmagnol F., Sinet P.M., Rapin J., Jerome H. Glutathione-S-transferase of human red blood cells; assay, values in normal subjects and in two pathological circumstances: Hyperbilirubinemia and impaired renal function. *Clin. Chim. Acta.* 1981; 117(2): 209–17. [https://doi.org/10.1016/0009-8981\(81\)90040-1](https://doi.org/10.1016/0009-8981(81)90040-1)
- Ansari G.A., Singh S.V., Gan J.C., Awasthi Y.C. Human erythrocyte glutathione S-transferase: a possible marker of chemical exposure. *Toxicol. Lett.* 1987; 37(1): 57–62. [https://doi.org/10.1016/0378-4274\(87\)90167-6](https://doi.org/10.1016/0378-4274(87)90167-6)

References

- Ivashchenko M.A., Fedoruk A.A., Martin S.V., Kudryashov I.N. Hygienic assessment of working conditions of smelters during lead production from secondary raw materials. In: *Problems of Hygienic Safety and Disease Prevention in Workers: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Internet Conference [Problemy gigienicheskoi bezopasnosti i profilaktiki narushenii trudospobnosti u rabotayushchikh: Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi internet-konferentsii]*. Nizhny Novgorod: Medial; 2021: 96–102. (in Russian)
- Gomzikova E.A., Shelomentsev I.G. Analysis of settled dust by X-ray fluorescence analysis (XRF) for express identification of the elemental composition of aerosols in the working area. In: *Practical Aspects of Public Health Monitoring and Health Risk Management: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation [Prakticheskie aspekty sotsial'no-gigienicheskogo monitoringa i upravleniya riskom zdorov'yu naseleniya: Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem]*. Ekaterinburg; 2023: 56–57. (in Russian)
- Giel-Pietraszuk M., Hybza K., Chełchowska M., Barciszewski J. Mechanisms of lead toxicity. *Adv. Cell Biol.* 2012; 39(2): 217–47.
- Jomova K., Alomar S.Y., Nepovimova E., Kuca K., Valko M. Heavy metals: Toxicity and human health effects. *Arch. Toxicol.* 2025; 99(1): 153–209. <https://doi.org/10.1007/s00204-024-03903-2>

5. Ryspekova N.N., Nurmukhambetov A.N., Askarova A.E., Akanov A.A. Role of heavy metals in anemia (review). *Vestnik Kazakhskogo natsional'nogo meditsinskogo universiteta*. 2013; (3–2): 46–51. <https://elibrary.ru/yofboa> (in Russian)
6. Schafer F.Q., Buettner G.R. Redox environment of the cell as viewed through the redox state of the glutathione disulfide/glutathione couple. *Free Radic. Biol. Med.* 2001; 30(11): 1191–212. [https://doi.org/10.1016/s0891-5849\(01\)00480-4](https://doi.org/10.1016/s0891-5849(01)00480-4)
7. Awasthi Y.C., Singh S.V. Purification and characterization of a new form of glutathione S-transferase from human erythrocytes. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 1984; 125(3): 1053–60. [https://doi.org/10.1016/0006-291x\(84\)91390-1](https://doi.org/10.1016/0006-291x(84)91390-1)
8. Amromina A.M., Sitnikov I.A., Shaikhova D.R. The relationship of polymorphic variants of genes *GSTM1*, *GSTT1*, *GSTP1* with the risk of developing diseases (literature review). *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100(12): 1385–90. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-12-1385-1390> <https://elibrary.ru/gnsavx> (in Russian)
9. Carmagnol F., Sinet P.M., Rapin J., Jerome H. Glutathione-S-transferase of human red blood cells; assay, values in normal subjects and in two pathological circumstances: Hyperbilirubinemia and impaired renal function. *Clin. Chim. Acta.* 1981; 117(2): 209–17. [https://doi.org/10.1016/0009-8981\(81\)90040-1](https://doi.org/10.1016/0009-8981(81)90040-1)
10. Ansari G.A., Singh S.V., Gan J.C., Awasthi Y.C. Human erythrocyte glutathione S-transferase: a possible marker of chemical exposure. *Toxicol. Lett.* 1987; 37(1): 57–62. [https://doi.org/10.1016/0378-4274\(87\)90167-6](https://doi.org/10.1016/0378-4274(87)90167-6)

Сведения об авторах

Шаихова Дарья Рамильевна, науч. сотр. отд. молекулярной биологии и электронной микроскопии ФБУН «ЕМНЦ ПОЗРПП» Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия. E-mail: darya.boov@mail.ru

Кикоть Анна Михайловна, науч. сотр. отд. молекулярной биологии и электронной микроскопии ФБУН «ЕМНЦ ПОЗРПП» Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия. E-mail: kikitam@ymrc.ru

Берёза Иван Андреевич, науч. сотр. отд. молекулярной биологии и электронной микроскопии ФБУН «ЕМНЦ ПОЗРПП» Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия. E-mail: berezaia@ymrc.ru

Сутункова Марина Петровна, доктор мед. наук, директор ФБУН «ЕМНЦ ПОЗРПП» Роспотребнадзора, 620014, Екатеринбург, Россия. E-mail: sutunkova@ymrc.ru

Information about the authors

Daria R. Shaikhova, researcher, Department of molecular biology and electron microscopy, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7029-3406> E-mail: darya.boov@mail.ru

Anna M. Kikot, researcher, Department of molecular biology and Electron Microscopy, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8794-7288> E-mail: kikitam@ymrc.ru

Ivan A. Bereza, researcher, Department of molecular biology and electron microscopy, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4109-9268> E-mail: berezaia@ymrc.ru

Marina P. Sutunkova, DSc (Medicine), director, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, 620014, Yekaterinburg, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1743-7642> E-mail: sutunkova@ymrc.ru